

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОГРАЖДЕНИЙ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

И. В. Носков, Е. П. Ширедченко

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Приводятся конструктивные решения ограждения котлованов с использованием различных типов шпунтов и современных технологий бетонирования. Показано, что при проектировании подземных и заглубленных сооружений должны быть предусмотрены технические решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность проектируемых конструкций на всех стадиях строительства и эксплуатации.

Ключевые слова: грунт, шпунт, котлован, метод расчета, технология.

Строительство подземных сооружений открытым способом может осуществляться как в котлованах без крепления, борта которых сформированы под углом естественного откоса грунта, так и в котлованах, подкрепленных ограждающими конструкциями.

Устройство котлованов в откосах является наиболее простым и, как правило, экономичным решением, однако применение этого способа встречает множество ограничений, особенно в условиях стесненной городской застройки.

Ограничением, в первую очередь, является требуемая глубина котлована. При увеличении глубины заложения следует делать более пологие откосы, занимаемая площадь и объемы вынутого из котлована грунта существенно возрастают, что делает этот способ нецелесообразным или невозможным в силу ограниченности площадки.

Существенно осложняют применение этого метода подземные воды, так как становится необходимым использование строительного водопонижения. Поэтому котлованы в откосах обычно устраиваются в условиях отсутствия застройки при глубоком залегании уровня подземных вод.

Классификация креплений котлованов приведена в разработанном Российской Академией архитектуры и строительных наук Руководстве по комплексному освоению подземного пространства крупных городов. Данная классификация приведена на рисунке 1.

Наиболее простой в исполнении и экономичной, является конструкция ограждения котлована, устраиваемая из вертикальных стальных элементов, погружаемых в грунт по контуру котлована.

По мере разработки грунта в котлованах между металлическими элементами устанавли-

вается забирка из деревянных досок, препятствующая осыпанию грунта в котлован (рисунок 2). При этом грунт разрабатывается послойно. Первые два слоя высотой 1 м, последующие – по 0,5 м.

В качестве несущих стальных элементов, как правило, используют трубы или двутавры, которые погружают в пробуренные лидерные скважины или задавливают.



Рисунок 1 – Классификация крепления котлованов

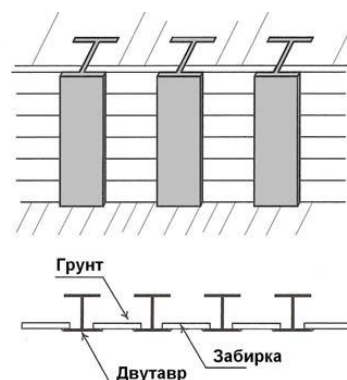


Рисунок 2 – Ограждение котлована из стальных элементов с забиркой

Двутавры так же можно погружать гидравлическими молотами или вибропогружением. При использовании в составе ограждения труб для их погружения возможно также применение технологии завинчивания. Данный тип ограждения не является водонепроницаемым, поэтому в случае его использования в водонасыщенных грунтах требуется водопонижение. По сравнению с прочими типами ограждения котлованов конструкция с забиркой обладает большей деформативностью и меньшей прочностью.

Диапазон его применения ограничивается, как правило, глубинами котлована до 10 м, его применение не рекомендуется при наличии в основании водонасыщенных структурно-неустойчивых грунтов.

Шпунтовые ограждения котлованов широко используются в гидротехническом строительстве и в условиях слабых водонасыщенных грунтов при высоких отметках уровня подземных вод. Такие конструкции способны воспринимать не только давление грунта, но и гидростатическое давление, являясь одновременно противофильтрационной завесой. Шпунтовые элементы стен представляют собой профили различного поперечного сечения (рисунок 3), снабженные замковыми захватами по краям, позволяющими фиксировать один элемент относительно другого в вертикальном положении. Наибольшее распространение получили U-образные шпунты типа «Ларсен».

Установка шпунта в грунт осуществляется обычно вибропогружением. Шпунтовые стены, устроенные в замок, обладают достаточно высокой жесткостью и способны воспринимать изгибающие моменты. Ограничением для использования шпунта является сложность или невозможность его погружения в гравелистых, скальных и полускальных грунтах.

В условиях города при наличии застройки использование шпунта может быть рекомендовано только при отсутствии в геологическом разрезе прочных грунтов, так как в ином случае погружение шпунта может привести к развитию значительных осадок зданий, расположенных вблизи котлована, а также к дискомфорту из-за шума для их жителей.

Ограждение котлована в идеальном случае должно сочетать в себе следующие основные функции: воспринимать боковое давление грунта, являться противофильтрационной завесой и воспринимать гидростатическое давление подземных вод, при необхо-

димости воспринимать вертикальные нагрузки, минимизировать влияние котлована на окружающую застройку.

Наиболее полно сочетанию всех этих функций отвечают конструкции, устраиваемые способом «стена в грунте». Известны различные конструктивные решения стен в грунте.

Наиболее подробно различные конструктивные решения стен в грунте, указания по производству работ, указания по подбору состава строительных растворов и бетонных смесей представлены в СТО-ГК «Трансстрой»-014-2007.

Существующие технологии устройства стены в грунте можно классифицировать на монолитные, сборные и сборно-монолитные. При устройстве монолитной стены в грунте разрабатывается узкая траншея требуемой глубины. Устойчивость стенок обеспечивается заполнением ее тиксотропным раствором из бентонитовых глин. Разработка траншеи ведется отдельными захватками, разделяемыми инвентарными ограничителями. Ограничители извлекаются перед бетонированием смежной захватки.

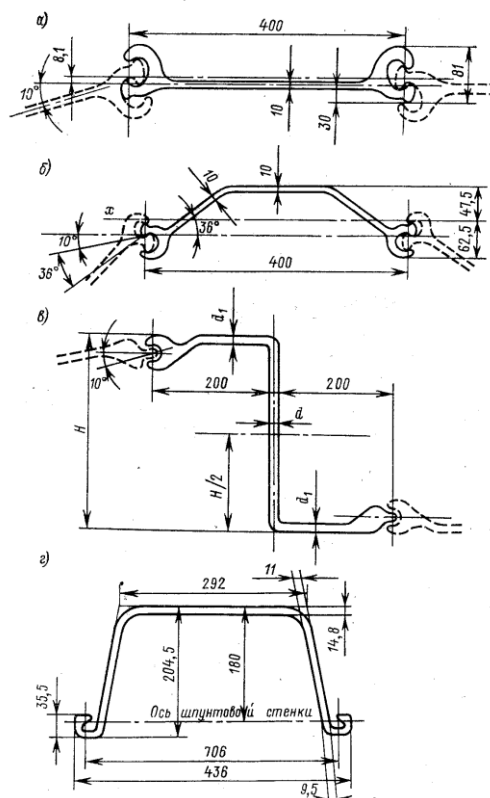


Рисунок 3 – Стальные шпунты:
а – плоский; б – корытный; в – зетовый; г – корытный типа «Ларсен»

Наиболее распространены трубчатые или фасонные металлические ограничители, позволяющие устраивать полукруглые стыки захваток или устанавливать между захватками гидроизолирующие вставки. После окончания экскавации в траншею устанавливается арматурный каркас. Далее в траншею опускается бетонолитная труба. Бетонирование, таким образом, ведется снизу вверх, при этом бетонная смесь вытесняет бентонитовый раствор на поверхность. После набора бетоном необходимой прочности приступают к бетонированию следующей захватки.

Устройство траншейных «стен в грунте» в городских условиях все же имеет ряд ограничений, связанных в первую очередь с возможностью ухода бентонитового раствора в полости в техногенных отложениях и макропористых грунтах. Недостатком «стен в грунте» является ее высокая стоимость.

В условиях, когда потери бентонитового раствора в грунтах возможны, применяют ограждение котлована из бурсекущихся свай. Если уровень подземных вод расположен ниже дна котлована или предполагается строительное водопонижение, ограждающая котлован конструкция может быть также выполнена из отдельно стоящих или касательных буровых свай. Применяемые на практике варианты планового расположения свай в составе ограждений котлованов приведены на рисунке 4, где номерами показана последовательность устройства свай.

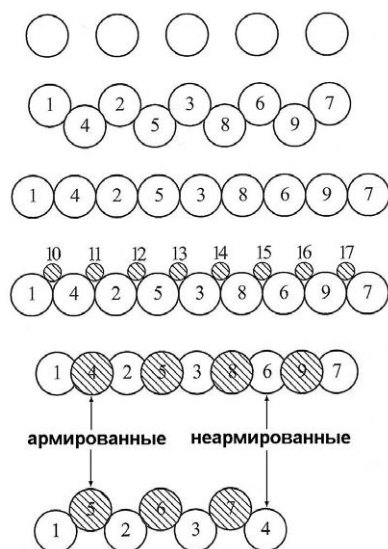


Рисунок 4 – Варианты планового расположения свай в составе ограждений котлованов

Для устройства тела свай применяются различные технологии, наиболее распространенной из которых является бурение грунта под защитой инвентарной обсадной трубы, бетонирование скважины с помощью поднимаемой бетонолитной трубы, погружение в несхватившийся бетон арматурного каркаса. Для устройства ограждений котлованов, как правило, применяют секущиеся сваи диаметром от 0.6 до 1.2 м, при отсутствии подземных вод применяют отдельные сваи меньших диаметров. Достаточно высокая прочность и жесткость свай позволяет разрабатывать под их защитой котлованы глубиной до 20-25 м. К недостаткам таких подпорных стен можно отнести худшую гидроизоляцию, чем у траншейных «стен в грунте», а также достаточно высокую стоимость. При некачественном выполнении свай в неустойчивых водонасыщенных грунтах следует опасаться возможных прорывов грунтовой массы в котлован через дефектные стыки.

Существует струйная технология (jet-grouting) ограждения котлованов. Суть этой технологии заключается в перемешивании грунта с цементным раствором или в полном замещении грунта раствором с помощью высоконапорной струи. Для этого в лидерные скважины малого диаметра погружается гидромонитор, имеющий боковое сопло для создания водяной струи высокого давления и торцевое отверстие для подачи твердеющего заполнителя. При подъеме буровой штанги включается вращающийся гидромонитор, осуществляющий под давлением до 50 МПа размыв грунта в скважине и одновременную подачу цементного раствора.

В результате в грунте образуется столб из грунтоцемента диаметром 0,8-1,5 м. При последовательном формировании соседних грунтоцементных элементов струйная технология применяется для устройства вертикальных экранов из jet-свай, которые, работая в составе ограждений котлованов, должны армироваться металлическими или железобетонными сердечниками. Стенки из jet-свай имеют рельефную шероховатую поверхность, поэтому при необходимости дополнительного крепления ограждения котлована следует проводить их выравнивание.

При проектировании подземных и заглубленных сооружений должны быть предусмотрены технические решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность проектируемых конструкций на всех стадиях строительства и эксплуатации. Указанная цель может быть достигнута путем

выполнения расчетов подземных конструкций по первой и второй группам предельных состояний. Расчеты ограждений котлованов по первой группе предельных состояний включают в себя расчет общей устойчивости системы «грунтовое основание – подпорная конструкция» (рисунок 5), расчет прочности грунтового основания и всех конструктивных элементов ограждения. Расчеты по второй группе предельных состояний включают в себя все виды расчета по деформациям, а также расчет по трещиностойкости для железобетонных элементов. Простые инженерные методы определения внутренних усилий в гибких подпорных конструкциях, предполагающие возможность ручного аналитического или графоаналитического расчета, существуют только для ограждений котлованов, работающих по консольной схеме или имеющих не более двух ярусов крепления.

Это методы определения распора и отпора грунта, базирующиеся на классической теории давления. При этом сами стенки рассматриваются как вертикальные балки, находящиеся под воздействием активного и пассивного давления грунта, определяемого по Кулону (методы Э. Якоби, Блюма-Ломейера и др.). Однако получаемые при этом коэффициенты запаса оказываются значительно завышенными, а конструктивные решения неэкономичными, что показали результаты крупномасштабных исследований, как лабораторных, так и натурных.

Уточнение существующих методов расчета заанкеренных стенок в части определения бокового давления грунта и анкерных усилий представляет собой весьма сложную задачу.

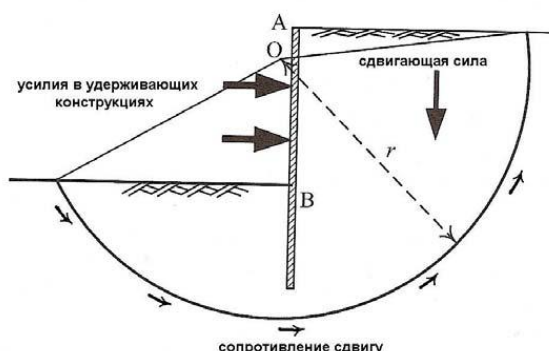


Рисунок 5 – Схема для расчета общей устойчивости системы «основание-ограждение котлована»

Такие вопросы, как точный учет активного давления грунта, оптимальная глубина погружения шпунта, форма упругой линии, перераспределение давления грунта по высоте стенки, условия «заделки» шпунта, взаимодействие стенки с грунтом засыпки в условиях допредельного и предельного состояний и другие, до настоящего времени остались не выясненными, а существующие теории и научные предположения, основанные в большинстве случаев на лабораторных опытах, к сожалению, еще недостаточно отражают действительную работу конструкций.

Возросшая сложность современных задач проектирования делает затруднительным использование простейших инженерных методов для расчета ограждений котлованов с многоярусным креплением.

Для расчета прочности и устойчивости гибких подпорных стен ограждений котлованов сегодня обычно используется специальное геотехническое программное обеспечение, связывающее общепринятые методики определения активного и пассивного давления грунта с современным математическим аппаратом для нелинейных моделей основания.

Наибольшее распространение при проектировании глубоких котлованов в настоящее время получили численные методы расчета, в которых рассматривается контактная задача взаимодействия гибкой подпорной конструкции с упруго-пластическим основанием, описываемым переменным коэффициентом постели. Для итерационного решения задачи используется классическое уравнение балки на упругом основании, в котором значения коэффициентов постели и правой части уравнения корректируются на каждом шаге итерации. Расчетная схема и алгоритм метода представлены на рисунке 6.

Для моделирования связи механической работы подземных сооружений с прилегающим грунтовым массивом используются численные методы (например, МКЭ, МКР).

Очевидно, что проведение расчетов имеет массу нюансов, связанных с нелинейным поведением грунтов и скальных пород. Широко используются конечно-элементные программы Plaxis (фирма Plaxis b.v.), Zsoil, Geoslope, FEModels, конечно-разностная программа FLAC и многие другие. В России наиболее популярны программные комплексы ЛИРА-САПР и SCAD, основанные на методе конечных элементов.

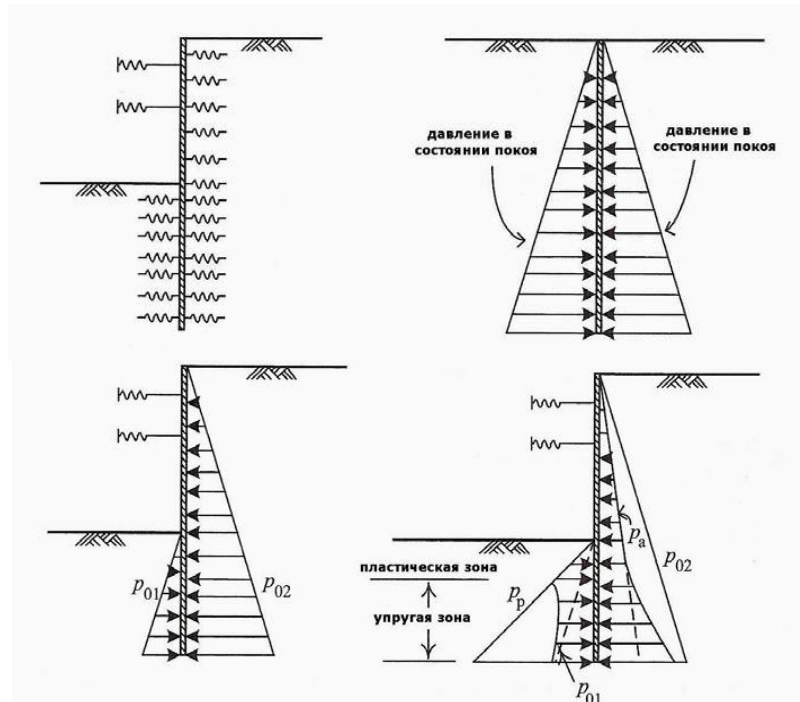


Рисунок 6 – Схема и алгоритм расчета ограждения котлована на основе контактной модели

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела (сопромата).

Суть метода следует из его названия. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (узлах) является решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значе-

ний в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение.

С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти, для численного анализа системы позволяет рассматривать его как одну из конкретных ветвей диакоптики — общего метода исследования систем путём их расчленения.

Носков И.В. — к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: noskov.56@mail.ru.

Ширедченко Е.П. — магистрант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова.